DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0348
文章编号:1671-8844(2026)09-1451-07

三峡水库库水位预报方法适用性研究

谭政宇[1],严方家[2],汪涛[3,4],张馨月[5],许银山[2],徐杨[3,4]

(1. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心,湖北 宜昌 443133; 2. 长江水利委员会水文局,湖北 武汉 430010;
3. 中国长江电力股份有限公司,湖北 宜昌 443002; 4. 智慧长江与水电科学湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443002;
5. 长江水利委员会水文局长江中游水文水资源勘测局,湖北 武汉 430010)

摘要: 基于统计分析和典型场次洪水过程资料,聚焦三峡水库库容特性,采用静库容调洪演算法和基于水力学模型的动库容调洪演算法,针对不同起调水位H、不同来水量级(洪峰流量Q)、不同来水组成的场景开展了定量对比分析。结果表明:当145 m$<H\leqslant$150 m、$Q\leqslant$20 000 m^3/s且以上游寸滩来水为主时,静库容法可以更方便、更快速地得到与动库容法相近的预报结果;随着H升高、来水量级增大、区间来水占比提高,三峡水库动库容的影响更为显著,动库容法的纳什效率系数维持在0.85以上。2种调洪演算法均有其适用场景,多数情况下需经综合比对后开展三峡水库的预报调度工作。

关键词: 库水位预报;动库容调洪演算法;静库容调洪演算法;三峡水库
中图分类号: TV 147.3　**文献标志码:** A

Research on the applicability of forecasting methods for the water level of the Three Gorges Reservoir

TAN Zhengyu[1], YAN Fangjia[2], WANG Tao[3,4], ZHANG Xinyue[5], XU Yinshan[2], XU Yang[3,4]

(1. River Basin Complex Administration Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China; 2. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 3. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 4. Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 5. Middle Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on statistical analysis and typical flood process data, focusing on the reservoir capacity characteristics of the Three Gorges Reservoir, a quantitative comparative analysis was carried out for scenarios with different initial water levels H, different flood magnitudes (peak discharge Q), and different flood compositions by adopting the static reservoir capacity flood regulation algorithm and the dynamic reservoir capacity flood regulation algorithm based on the hydraulic model. The results show that when 145 m$<H\leqslant$150 m and $Q\leqslant$ 20 000 m^3/s and the inflow is dominated by that from Cuntan Station inflow, the static capacity method can conveniently and quickly obtain results comparable to those of the dynamic reservoir capacity method conveniently and quickly. With the rise of H, the increase of flood magnitude and the increase of interval inflow proportion, the impact of the dynamic reservoir capacity of the Three Gorges Reservoir is more

收稿日期: 2024-08-23
作者简介: 谭政宇(1994-),男,博士研究生,工程师,主要从事水库调度研究,E-mail: tan_zhengyu@ctg.com.cn。
通信作者: 许银山(1985-),男,博士,正高级工程师,主要从事水文预报及水库调度研究,E-mail: yinshanxu@163.com。
基金项目: 国家重点研发计划项目(编号:2021YFC3200301);中国长江三峡集团有限公司科研项目(编号:0704206)。

本文引用格式: 谭政宇,严方家,汪涛,等.三峡水库库水位预报方法适用性研究[J].武汉大学学报(工学版),2026,59(9):1451-1457.

Citation: TAN Zhengyu, YAN Fangjia, WANG Tao, et al. Research on the applicability of forecasting methods for the water level of the Three Gorges Reservoir[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(9): 1451-1457.

significant; the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of the dynamic reservoir capacity method remains above 0.85. Both methods have their applicable scenarios, and it is necessary to conduct forecasting and regulation of the Three Gorges Reservoir through comprehensive comparison.

Key words: reservoir water level forecasting; dynamic reservoir capacity flood regulation algorithm; static reservoir capacity flood regulation algorithm; Three Gorges Reservoir;

三峡工程是治理、开发和保护长江的关键性骨干工程,蓄水运用20 a来持续发挥巨大的综合效益[1]。随着经济社会的快速发展,地方政府及各行业部门对三峡水库的功能和调度提出了更多、更高的要求[2]。然而,三峡水库属于典型的河道型水库,动库容及库区洪水演进的影响不容忽视,不同来水条件对水库坝前水位涨落的影响程度不同,开展三峡水库库水位精细化预报的难度较大。因此,针对不同来水情景,采取合适的方法科学、准确地开展三峡水库库水位预报对制定短、中、长期调度策略以及发挥水库综合效益至关重要。为此,众多学者针对三峡水库的库水位预报方法开展了研究:在三峡水库初期蓄水期,唐海华等[3]采用分段静库容法计算三峡水库的入库流量并用于库水位预报,该方法具有广泛的推广应用价值,但未能考虑三峡水库成库后动库容的影响;仲志余等[4]、张俊等[5]研究发现,三峡水库为典型的河道型水库,当遭遇较大洪水过程时,动库容的影响不容忽视;周建军等[6-7]进一步探讨了三峡水库动库容特性及其在防洪调度中的应用,为开展动库容影响下的三峡水库库水位预报奠定了良好的基础;吴天蛟等[8]、徐玲玲等[9]、王雨潇等[10]采用不同的数值计算方法对2016年以前三峡库区的洪水过程进行了模拟,均取得了较好的效果,但其采用的洪水样本数量有限,无法明确不同方法在不同场景下的适用范围。此外,随着信息技术的快速发展,刘晓阳等[11]、王永强等[12]探讨了机器学习、深度学习等新方法在三峡水库入库洪水预报和库水位预报中的应用,为库水位预报提供了新的思路。

以往研究聚焦于三峡水库的动库容特性,采用不同方法开展动库容影响下的库水位模拟与预报,但大多仅针对部分场次洪水进行了模拟,对不同方法的适用场景缺乏系统梳理。

1 库水位预报方法介绍

库水位预报主要采用水库调洪演算法,该方法基于水量平衡原理,结合入库洪水过程,利用水库的泄流能力曲线、水位-库容曲线等,按照规定的防洪调度规则,预报库水位变化过程、最高调洪水位。

1.1 静库容调洪演算法

静库容调洪演算法(下文简称为"静库容法")仅考虑静库容对洪水的调节作用,计算方法简单实用、直观明了,但需要准确预报入库流量,适用于库面宽阔、附加比降较小、楔形水体影响微弱的湖泊型水库[13]。静库容法的基础是联立求解水量平衡方程与水库蓄泄关系,水库的时段水量平衡方程为

$$\frac{(I_1+I_2)}{2}\Delta t-\frac{(O_1+O_2)}{2}\Delta t+(P-E)\bar{A}=V_2-V_1 \tag{1}$$

式中:I_1、I_2分别为时段始、末入库流量;O_1、O_2分别为时段始、末出库流量;V_1、V_2分别为时段始、末蓄水量;P为时段内水库水面降水水深;E为时段内水库水面蒸发水深及库区渗漏水深;$\bar{A}$为时段内水库水面面积平均值;Δt为演算时段。一般情况下,$(P-E)\bar{A}$项的数值相对较小,可忽略不计。

三峡水库静库容调洪的入库流量由上游寸滩、武隆站实测来水叠加区间来水量构成,出库流量采用报汛值,根据三峡水库水位-库容曲线,计算不同场次洪水下的三峡水库库水位。

1.2 动库容调洪演算法

当楔形库容对库区水面线及洪水演进影响较大时,如库区河道狭窄的河道型水库或支流众多的河网型水库,则需要采用基于水力学模型的动库容调洪演算法(下文简称为"动库容法")进行计算[14]。

本文采用肖扬帆等[15]基于MIKE11构建的水力学与产汇流耦合的三峡库区洪水演进模型,其中区间来水部分采用降雨径流模型(Nedbør-Afstrømnings model, NAM)计算,以旁侧入流的方式汇入干流并演算至坝前,共建立13个NAM模型,其中8个有水文站控制,可率定模型参数;其余5个借用邻近流域参数。模型采用2014—2017年实测资料进行参数率定、2018—2020年实测资料进行验证,模拟精度达到水文预报乙级标准以上。

2 场次洪水挑选及划分

本文挑选了2011—2020年间起调水位H为145~170 m、洪峰流量Q为16 500~78 000 m^3/s的场次洪水共47场,典型场次洪水基本情况见表1。

表 1　典型场次洪水基本情况

Table 1　Basic information of typical flood events

序号	开始时间	结束时间	H/m	开始水位/m	结束水位/m	Q/($m^3 \cdot s^{-1}$)	次洪时段长/h
1	2011年9月30日20:00	2011年10月7日20:00	＞160	166.08	169.37	16 500	168
2	2011年10月10日14:00	2011年10月20日20:00	＞160	170.03	174.24	17 000	246
3	2013年7月9日20:00	2013年7月17日14:00	(145,150]	147.32	149.88	40 500	186
4	2018年7月3日20:00	2018年7月8日14:00	(145,150]	145.43	148.72	53 000	114
5	2018年7月28日14:00	2018年8月12日14:00	(150,155]	152.48	154.42	44 000	360
6	2019年8月20日20:00	2019年8月28日2:00	(145,150]	145.75	147.10	27 000	174
7	2020年6月17日8:00	2020年6月27日2:00	(145,150]	146.10	146.12	36 500	234
8	2020年7月10日14:00	2020年7月15日14:00	(150,155]	150.03	155.77	37 000	120

水库动库容的大小，除与库区水力特性有关外，还受坝前水位、入库流量、出库流量等因素的影响。根据日常预报业务实践，起调水位、洪峰流量和来水组成对三峡水库的库水位预报结果影响较大，因此，为分析2种调洪演算方法在不同场景下的模拟效果，本文将47场洪水按照起调水位、来水量级和来水组成进行划分，具体划分如下：

1)将各场次洪水从145 m起，每5 m划分一个水位级，同时考虑到H＞160 m以上的样本偏少，故160 m以上的样本合并为同一水位级进行分析，共划分为以下4个起调水位级：145 m＜H≤150 m、150 m＜H≤155 m、155 m＜H≤160 m、H＞160 m；

2)依据Q的大小，将来水划分为以下5个量级：Ⅰ级(Q≤20 000 m^3/s)、Ⅱ级(20 000 m^3/s＜Q≤30 000 m^3/s)、Ⅲ级(30 000 m^3/s＜Q≤40 000 m^3/s)、Ⅳ级(40 000 m^3/s＜Q≤50 000 m^3/s)、Ⅴ级(Q＞50 000 m^3/s)；

3)根据来水组成，三峡水库入库洪水大致可分为以下3种典型来水类型：以上游寸滩来水为主、以区间来水为主、以上游寸滩与区间来水共同为主。

3　不同场景下库水位预报方法对比

针对47场洪水样本，本文分别采用静库容法和动库容法进行模拟预报，并从过程和最高水位两方面对库水位的预报误差进行分析，其中过程预报精度采用平均误差和纳什效率系数进行评定，最高水位预报精度采用绝对误差和最高水位出现时间误差进行评定。

表2列出了所有场次洪水样本的预报精度。整体上来看，动库容法的预报效果要优于静库容法。从库水位过程的预报结果来看，动库容法预报得到的平均误差为0.25 m，较静库容法的0.38 m的平均误差减小了0.13 m，纳什效率系数也由0.80提升至0.90。从最高调洪水位的预报结果来看，2种方法的预报结果均较实况略偏低，其中动库容法预报的最高水位绝对误差平均值为0.27 m，较静库容法的误差减小了0.09 m，而最高水位出现的时间误差为3.8 h，比静库容法小了近2.0 h。

表 2　库水位预报方法误差统计结果

Table 2　Results of error statistics for reservoir water level forecasting methods

统计参数	平均值		范围	
	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法
平均误差/m	0.38	0.25	[0.08,0.91]	[0.06,0.76]
纳什效率系数	0.80	0.90	[0.02,1.00]	[0.21,1.00]
最高水位绝对误差/m	0.36	0.27	[−1.00,0.81]	[−0.90,0.83]
最高水位出现时间误差/h	5.7	3.8	[−18.0,18.0]	[−18.0,24.0]

3.1　不同起调水位下库水位预报方法对比

表3为不同H下库水位预报方法误差统计结果。由表3可知：当三峡水库145 m＜H≤150 m时，静库容法和动库容法预报的效果相当，平均误差和最高水位绝对误差均在0.35 m左右，动库容法的纳什效率系数高于静库容法，最高水位出现时间误差小于静库容法。随着H升高，静库容法的平均误差增大至0.40 m以上，纳什效率系数有所提升，动库容法的预报精度总体有所提升，当H＞160 m时，动库容法的平均误差减小至0.15 m，纳什效率系数提升至0.97。

库区水面线形态直接决定水库动库容的大小。当H较低时，动库容较小，静库容法模拟效果尚可；H越高，对应的动库容越大，动库容法能更好地反映动库容的影响。

本文选取三峡水库2018年7月3—8日、2020年7月10—15日、2011年10月10—20日3场典型洪水过程进行误差分析，如图1所示。由图1可知：当三

表 3 不同 H 下库水位预报方法误差统计结果

Table 3 Results of error statistics for reservoir water level forecasting methods under different H

H/m	平均误差/m		纳什效率系数		最高水位绝对误差/m		最高水位出现时间误差/h	
	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法
(145,150]	0.36	0.30	0.71	0.88	0.38	0.35	5.7	3.2
(150,155]	0.35	0.23	0.90	0.85	0.33	0.21	4.4	3.3
(155,160]	0.44	0.25	0.94	0.97	0.39	0.27	7.3	6.7
>160	0.41	0.15	0.76	0.97	0.32	0.18	6.0	3.0

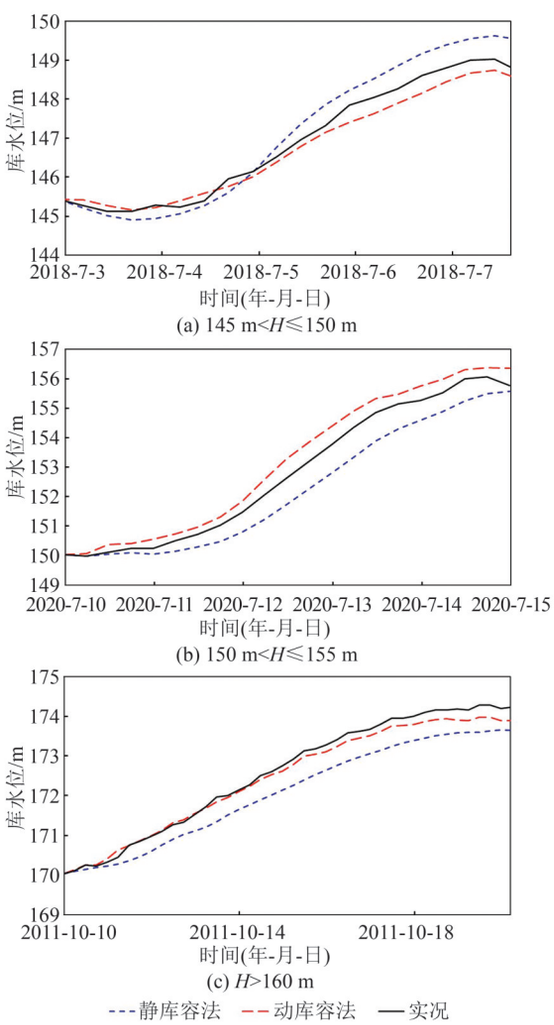


图 1 不同 H 下典型洪水库水位预报对比

Fig.1 Comparison of reservoir water level forecasting results of typical floods under different H

峡水库 H 在汛限水位 145 m 附近时,静库容法模拟的库水位过程较实况偏高,而动库容法的模拟结果偏低,在实际预报过程中可对这 2 种方法的库水位预报结果取中值。随着 H 升高,三峡水库动库容增大,动库容法的模拟过程逐步接近实况库水位过程,而静库容法的模拟结果明显偏低。

3.2 不同来水量级下库水位预报方法对比

不同来水量级下静库容法和动库容法的库水位预报误差结果见表 4。结果表明:随来水量级增大,2 种方法的纳什效率系数整体呈波动上升趋势;静库容法的平均误差整体呈增大趋势,当来水量级为Ⅰ级时,平均误差为 0.30 m,当来水量级为Ⅳ级时,平均误差达到 0.50 m,对应最高水位绝对误差也达到 0.51 m。动库容法的平均误差整体呈波动增大趋势,但总体误差小于静库容法的。因此,当三峡水库来水量较大时,建议优先采用动库容法预报库水位。

表 4 不同来水量级下库水位预报方法误差统计结果

Table 4 Results of error statistics for reservoir water level forecasting methods under different flood magnitudes

来水量级	平均误差/m		纳什效率系数		最高水位绝对误差/m		最高水位出现时间误差/h	
	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法
Ⅰ	0.30	0.14	0.85	0.94	0.33	0.15	6.0	4.3
Ⅱ	0.32	0.22	0.77	0.89	0.34	0.27	5.1	5.6
Ⅲ	0.41	0.30	0.78	0.86	0.36	0.34	5.1	3.2
Ⅳ	0.50	0.23	0.78	0.93	0.51	0.22	8.6	0.9
Ⅴ	0.44	0.33	0.90	0.96	0.25	0.32	5.0	4.0

以往研究成果[16]表明,来水量级越大,动库容占库容的比例越大。其中,当三峡水库入库流量在 15 000~30 000 m^3/s 时,动库容占总库容的比例为 1.5%~10.0%;当入库流量在 30 000~45 000 m^3/s 时,动库容占总库容的比例为 6.0%~15.0%。当动库容占比增大时,动库容法可以更好地模拟和预报三峡水库库水位的上涨过程。

本文选取三峡水库 2011 年 8 月 21—28 日、2011 年 7 月 3—15 日、2018 年 7 月 28 日—8 月 10 日 3 场典型洪水过程作为不同来水量级库水位预报的典型样本,如图 2 所示。由图 2 可知:当来水量级为Ⅱ级时,2 种方法均可较好地模拟三峡水库库水位的变化过程:静库容法模拟的过程起涨较实况偏晚,但对最高水位的模拟效果较好;动库容法的整体过程模拟效果相对较好,但最高水位略偏低;当三峡水库来水量级为Ⅲ级时,静库容法和动库容法的模拟效果基本相当,在实际预报过程中可综合这 2 种方法的库水位预报结果;当来水量级超过Ⅲ级时,动库容较大,动库容法的模拟结果与实况更为吻合。

3.3 不同来水组成下库水位预报方法对比

不同来水组成下静库容法和动库容法的库水

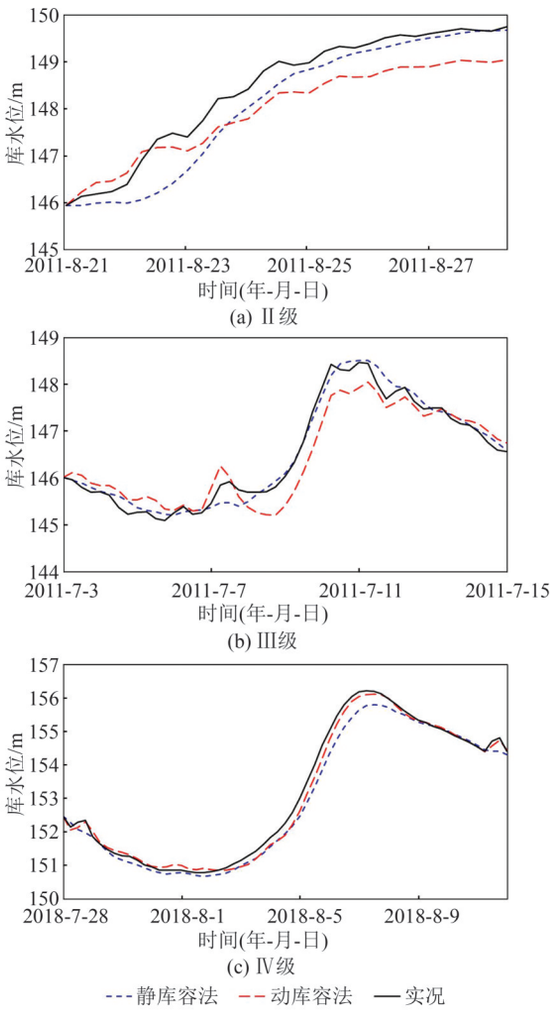


图 2　不同来水量级典型洪水库水位预报对比

Fig.2　Comparison of reservoir water level forecasting results of typical floods under different flood magnitudes

位预报误差对比结果见表 5。结果表明：当三峡水库入库以区间来水为主时，静库容法的平均误差增大至 0.53 m；动库容法在不同来水组成条件下模拟效果相差不大，平均误差均在 0.25 m 左右，即便随着区间来水占比增加，其纳什效率系数始终保持在 0.85 以上。

静库容法将区间降雨径流过程作为整体考虑，未能考虑区间降水落区及产汇流特性。当以上游寸滩来水为主时，静库容法可对区间产汇流过程进行概化，以实现快速计算；但当以区间来水为主，尤其是近坝段出现集中强降雨时，区间产流大、汇流快，往往会造成库水位提前上涨，而动库容法能更好地捕捉此类变化。

本文选取三峡水库 2020 年 9 月 14—24 日、2020 年 6 月 17—27 日、2011 年 9 月 30 日—10 月 7 日 3 场典型洪水过程，以分析不同来水组成对库水位预报方法的影响，如图 3 所示。由图 3 可知：当三峡水库以上游寸滩来水为主时，静库容法和动库容法的模拟效果基本相当，2 种方法均可较好地模拟库水位的上涨过程，但最高水位均偏低；当以上游寸滩与区间来水为主时，静库容法计算所得库水位整体偏大；对于来水过程复杂波动的情况，静库容法的模拟效果较差；动库容法的调洪计算结果误差更小，对库水位波动变化的模拟更符合实际，最高水位及出现时间的模拟与实况吻合较好；当以区间来水为主时，动库容法的效果明显更好，静库容法未能考虑动库容的影响，整体模拟精度显著偏低。

4　结论

本文针对三峡水库库水位预报方法开展了适用性研究，通过统计分析和典型场次洪水过程对比分析，明确了静库容调洪演算法和动库容调洪演算法的适用场景。结果表明：基于水力学模型的动库容法对资料要求更高，但适用范围更广、预报效果更好，尤其是在 H 较高、来水量级较大、区间来水占比较大的情况下，三峡水库的动库容影响更为显著，水力学模型可以更好地模拟库水位变化过程；静库容法简便易行，当 145 m＜H≤150 m、Q≤20 000 m^3/s、三峡水库遭遇中小洪水且以上游寸滩来水为主时，动库容影响较小，可以优先采用静库容法获得快速可靠的库水位预报结果。具体结论如下：

1）当三峡水库的 H 较低（145 m＜H≤150 m）时，静库容法和动库容法预报效果相当，平均误差和最高水位绝对误差均在 0.35 m 左右。H 越高，对应的动库容越大，静库容法的平均误差增大至

表 5　不同来水组成库水位预报方法误差统计结果

Table 5　Results of error statistics for reservoir water level forecasting methods under different flood compositions

主要来水组成	平均误差/m		纳什效率系数		最高水位绝对误差/m		最高水位出现时间误差/h	
	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法	静库容法	动库容法
上游寸滩	0.33	0.23	0.84	0.92	0.32	0.26	5.4	4.4
上游寸滩与区间	0.43	0.28	0.63	0.86	0.30	0.25	6.0	2.3
区间	0.53	0.27	0.85	0.88	0.54	0.33	6.7	3.3

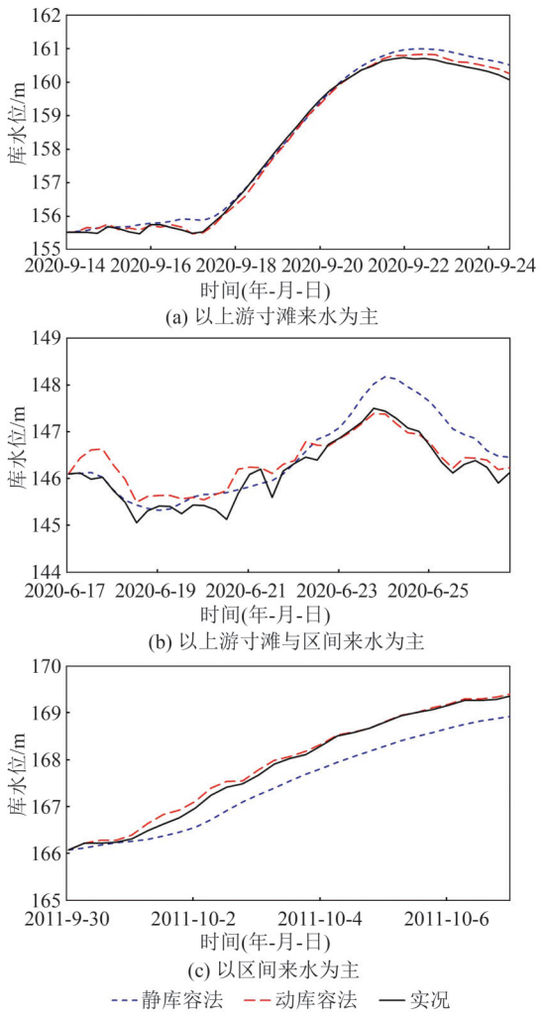


图 3 不同来水组成下典型洪水库水位预报对比

Fig.3 Comparison of reservoir water level forecasting results of typical floods under different flood compositions

0.40 m 以上，而动库容法精度逐步提升；当 $H>160$ m 时，平均误差减小至 0.15 m，纳什效率系数提升至 0.97。

2）随来水量级的增大，2 种方法的纳什效率系数总体呈波动上升趋势，静库容法由 0.85 提升至 0.90，动库容法由 0.94 提升至 0.96。但来水量级越大，动库容占总库容的比例越高，静库容法的平均误差总体呈增大趋势。当来水量级为Ⅰ级时，平均误差为 0.30 m；当来水量级为Ⅳ级时，平均误差达到 0.50 m，且对应最高水位绝对误差也达到 0.51 m。

3）当三峡水库入库以上游寸滩来水为主时，2 种方法的预报效果相当。随着区间来水占比增加，静库容法的模拟效果逐渐变差；当三峡水库入库以区间来水为主时，静库容法的平均误差为 0.53 m。动库容法在不同来水组成条件下模拟效果相差不大，平均误差均在 0.25 m 左右；随着区间来水占比增加，动库容法可更好地模拟区间产汇流过程，纳什效率系数始终保持在 0.85 以上。

此外，考虑到三峡水库来水预报的不确定性与调度边界条件的复杂性，针对不同来水条件和工况，采用多种预报方法组合的方式可能会进一步提升库水位预报的准确性，这也是今后研究的重点方向。

参考文献：

[1] 胡兴娥，曹瑞．三峡工程蓄水运用20年综合效益发挥与展望[J]．长江科学院院报，2024，41(6)：1-9.
HU Xing'e，CAO Rui. Review and prospect of comprehensive benefits of Three Gorges Project in 20 years of operation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2024，41(6)：1-9.

[2] 郭生练，王俊，谢雨祚，等．面向新时期新需求的三峡水库运行方案研究[J]．水利学报，2024，55(4)：379-388.
GUO Shenglian，WANG Jun，XIE Yuzuo，et al. Three Gorges Reservoir operation scheme facing the New Era and new demands[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2024，55(4)：379-388.

[3] 唐海华，陈森林，赵云发，等．三峡水库入库流量计算方法研究[J]．中国农村水利水电，2008(4)：26-28.
TANG Haihua，CHEN Senlin，ZHAO Yunfa，et al. Study on calculation method of inflow of Three Gorges Reservoir[J]. China Rural Water and Hydropower，2008(4)：26-28.

[4] 仲志余，李文俊，安有贵．三峡水库动库容研究及防洪能力分析[J]．水电能源科学，2010，28(3)：36-38.
ZHONG Zhiyu，LI Wenjun，AN Yougui. Study on dynamic reservoir capacity and flood control capacity of Three Gorges Reservoir[J]. Water Resources and Power，2010，28(3)：36-38.

[5] 张俊，闵要武，陈新国．三峡水库动库容特性分析[J]．人民长江，2011，42(6)：90-93.
ZHANG Jun，MIN Yaowu，CHEN Xinguo. Analysis of characteristics of dynamic reservoir capacity of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River，2011，42(6)：90-93.

[6] 周建军，程根伟，袁杰，等．三峡水库动库容特征及其在防洪调度上的应用：1.库水位调度控制的灵敏性[J]．水力发电学报，2013，32(1)：163-167.
ZHOU Jianjun，CHENG Genwei，YUAN Jie，et al. Dynamic storage of Three Gorges Reservoir and its application to flood regulations：1. Sensitivity in regulation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2013，32(1)：163-167.

[7] 周建军，程根伟，袁杰，等. 三峡水库动库容特征及其在防洪调度上的应用：2. 动态汛限水位调度方法[J]. 水力发电学报，2013，32(1)：168-173.
ZHOU Jianjun，CHENG Genwei，YUAN Jie，et al. Dynamic storage of Three Gorges Reservoir and its application to flood regulations：2. Flood regulations with dynamic flood control levels[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2013，32(1)：168-173.

[8] 吴天蛟，杨汉波，李哲，等. 基于MIKE11的三峡库区洪水演进模拟[J]. 水力发电学报，2014，33(2)：51-57.
WU Tianjiao，YANG Hanbo，LI Zhe，et al. Modeling of flood routing for Three Gorges Reservoir area based on MIKE11[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2014，33(2)：51-57.

[9] 徐玲玲，张瀚文. 基于数值解析法的水库动库容调洪计算[J]. 水电能源科学，2017，35(4)：67-68.
XU Lingling，ZHANG Hanwen. Calculation of reservoir dynamic storage capacity based on numerical analytical method[J]. Water Resources and Power，2017，35(4)：67-68.

[10] 王雨潇，刘波，王文鹏，等. 基于HEC-HMS模型的三峡区间洪水模拟[J]. 长江科学院院报，2024，41(6)：76-83.
WANG Yuxiao，LIU Bo，WANG Wenpeng，et al. Simulation of flood in Three Gorges Region based on HEC-HMS model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute，2024，41(6)：76-83.

[11] 刘晓阳，姚华明，张海荣，等. 基于机器学习的三峡水库小时尺度坝前水位预测[J]. 人民长江，2023，54(2)：147-151.
LIU Xiaoyang，YAO Huaming，ZHANG Hairong，et al. Hourly pre-dam water level prediction of Three Gorges Reservoir based on machine learning methods[J]. Yangtze River，2023，54(2)：147-151.

[12] 王永强，张森，谢帅，等. 基于深度学习的三峡电站未来坝前最大最小水位预测[J]. 长江科学院院报，2024，41(12)：9-14.
WANG Yongqiang，ZHANG Sen，XIE Shuai，et al. Predicting maximum and minimum future water levels in front of the Three Gorges Dam using deep learning[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute，2024，41(12)：9-14.

[13] 纪国良，刘涛，胡腾腾，等. 距离度量学习法在水库静库容调洪演算中的应用[J]. 水电能源科学，2020，38(8)：62-65.
JI Guoliang，LIU Tao，HU Tengteng，et al. Application of distance measurement algorithm in calculation of flood regulation based on static reservoir capacity[J]. Water Resources and Power，2020，38(8)：62-65.

[14] 芦云峰. 河道型水库洪水演进研究进展及存在的问题[J]. 长江科学院院报，2019，36(10)：122-126.
LU Yunfeng. Flood routing in river-reservoir system：research advances and existing problems[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2019，36(10)：122-126.

[15] 肖扬帆，周曼，胡挺，等. 基于MIKE11的三峡库区洪水演进模拟及洪水传播规律研究[J]. 水电能源科学，2022，40(10)：74-77.
XIAO Yangfan，ZHOU Man，HU Ting，et al. Research on flood routing modeling and flood propagation law for the Three Gorges Reservoir based on MIKE11[J]. Water Resources and Power，2022，40(10)：74-77.

[16] 程海云，周新春，闵要武，等. 三峡水库试验性蓄水期实时预报调度关键技术[M]. 北京：科学出版社，2022：190-192.
CHENG Haiyun，ZHOU Xinchun，MIN Yaowu，et al. Key Technologies of Real-Time Forecasting and Dispatching in Experimental Water Storage Period of Three Gorges Reservoir[M]. Beijing：Science Press，2022：190-192.

（编辑：陶佳音）